

ANALISIS DISTRIBUSI KECEPATAN PENDINGIN DALAM ELEMEN BAKAR TIPE PELAT MENGGUNAKAN METODE CFD UNTUK REAKTOR RISET RSG-GAS

Muhammad Subekti, Darwis Isnaini, Endiah Puji Hastuti
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN. Komplek Puspiptek Gedung No.80
Serpong Tangerang Selatan 15310.
Email: subekti@batan.go.id.

Diterima editor 04 Maret 2013
Disetujui untuk publikasi 15 April 2013

ABSTRAK

ANALISIS DISTRIBUSI KECEPATAN PENDINGIN DALAM ELEMEN BAKAR TIPE PELAT MENGGUNAKAN METODE CFD UNTUK REAKTOR RISET RSG-GAS. Eksperimen pengukuran distribusi kecepatan pendingin dalam subkanal elemen bakar reaktor riset RSG-GAS sulit dilakukan karena lebar celah yang sangat kecil dan terletak di dalam elemen bakar. Oleh karena itu diperlukan perhitungan untuk memprediksi distribusi kecepatan pendingin dalam subkanal untuk mengkonfirmasi bahwa keberadaan handle tidak merusak distribusi kecepatan pendingin masuk ke dalam setiap subkanal. Perhitungan ini memerlukan metode CFD yang memperhatikan interior 3 dimensi. Perhitungan distribusi kecepatan pendingin dalam subkanal juga belum pernah dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah melakukan investigasi distribusi kecepatan pendingin elemen bakar tipe pelat menggunakan metode CFD 3 dimensi untuk reaktor riset RSG-GAS. Penelitian ini juga sangat diperlukan sebagai bagian dari pengembangan desain termohidrolika elemen bakar untuk reaktor riset inovatif. Pemodelan menggunakan $\frac{1}{2}$ model dalam perangkat lunak Gambit dan perhitungan menggunakan persamaan Turbulen dalam perangkat lunak FLUENT 6.3. Hasil perhitungan kecepatan pendingin tiga dimensi dalam subkanal menggunakan metode CFD lebih rendah sekitar 4,06% dari pada hasil perhitungan satu dimensi karena perhitungan satu dimensi mengabaikan keberadaan handle.

Kata kunci: Aliran pendingin, elemen bakar, reaktor riset, kondisi tunak, CFD

ABSTRACT

THE ANALYSIS OF COOLANT-VELOCITY DISTRIBUTION IN PLAT-TYPED FUEL ELEMENT USING CFD METHOD FOR RSG-GAS RESEARCH REACTOR. The measurement experiment for coolant-velocity distribution in the subchannel of fuel element of RSG-GAS research reactor is difficult to be carried out due to too narrow channel and subchannel placed inside the fuel element. Hence, the calculation is required to predict the coolant-velocity distribution inside subchannel to confirm that the handle presence does not ruin the velocity distribution into every subchannel. This calculation utilizes CFD method, which respect to 3-dimension interior. Moreover, the calculation of coolant-velocity distribution inside subchannel was not ever carried out. The research object is to investigate the distribution of coolant-velocity in plat-typed fuel element using 3-dimension CFD method for RSG-GAS research reactor. This research is required as a part of the development of thermalhydraulic design of fuel element for innovative research reactor as well. The modeling uses $\frac{1}{2}$ model in Gambit software and calculation uses turbulence equation in FLUENT 6.3 software. Calculation result of 3D coolant-velocity in subchannel using CFD method is lower about 4,06% than 1D calculation result due to 1D calculation obeys handle availability.

Keywords: Coolant flow, fuel element, research reactor, steady state, CFD

PENDAHULUAN

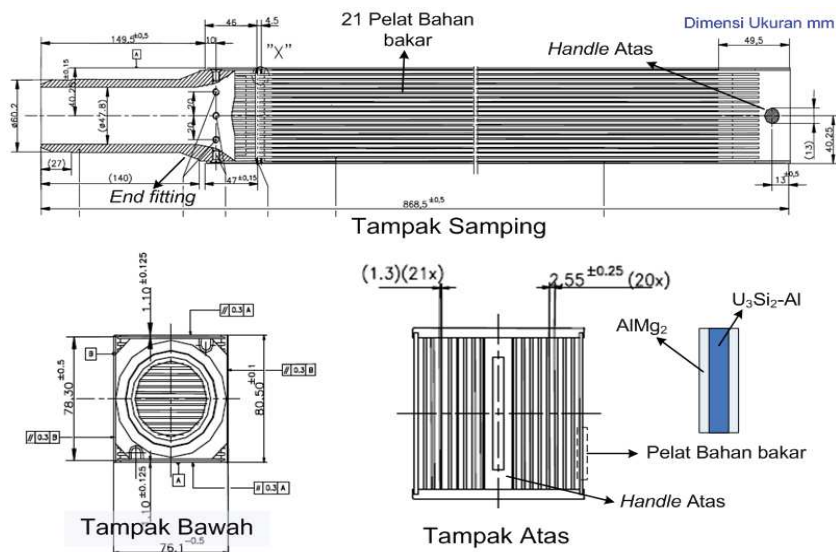
Distribusi kecepatan pendingin air dalam elemen bakar Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) sebagai aliran subkanal perlu dihitung dengan akurat. Kesulitan eksperimen dalam mengukur kecepatan pendingin dalam subkanal elemen bakar disebabkan karena celah subkanal yang sangat kecil sebesar 2,55 mm dan konstruksi interior subkanal terletak di dalam elemen bakar. Eksperimen perhitungan kecepatan pendingin dilakukan dengan cara pengukuran laju alir dalam elemen bakar bagian ujung *fitting* bawah sebesar 46,13 m³/h atau 12,71 kg/s di posisi D5 [1]. Berdasarkan pengukuran ini, maka luas aliran dapat dibandingkan dengan luas aliran subkanal sehingga kecepatan pendingin dalam subkanal dapat dihitung dengan asumsi seluruh subkanal memiliki kecepatan pendingin yang seragam. Asumsi ini belum pernah diuji mengingat interior atas terdapat penyempitan luas aliran sebelum aliran pendingin masuk ke subkanal karena adanya konstruksi *handle* elemen bakar. Oleh karena itu, perhitungan akurat distribusi kecepatan pendingin dalam setiap kanal perlu dilakukan menggunakan metode yang mampu menghitung secara 3 dimensi, yaitu metode dinamika fluida (*computational fluid dynamics*, CFD) untuk mengkonfirmasi bahwa keberadaan *handle* tidak merusak distribusi kecepatan pendingin masuk ke dalam setiap subkanal.

Kondisi konstruksi *handle* elemen bakar kemungkinan bisa menghalangi sebagian aliran dari atas memasuki subkanal. Perhitungan menggunakan metode CFD memasukkan banyak faktor friksi termasuk friksi dalam subkanal, kondisi interior 3 dimensi, laju alir, temperatur, tekanan, dimensi luas aliran dan sebagainya. Studi hidrolika aliran turbulen dalam elemen bakar tipe *Material Testing Reactor* (MTR) telah dilakukan oleh peneliti lain menggunakan metode CFD untuk mengetahui dampak keberadaan *handle* elemen bakar yang mengakibatkan perbedaan kecepatan pendingin lokal sebesar 5% dibandingkan dengan kecepatan rerata akibat dari penurunan *pressure drop* lokal $\leq 3\%$ [2]. Penelitian terkini berhasil melakukan validasi metode CFD pada kondisi transien kehilangan pendingin untuk reaktor riset generik IAEA 10 MW[3]. Kemudian, hasil perhitungan ini dibandingkan dengan perhitungan menggunakan kode termohidrolika standar yang telah dilakukan sebelumnya[4]. Validasi ini merekomendasikan model menyeluruh untuk memastikan keterbatasan pada batas kondisi dan memerlukan jumlah diskritisasi yang luar biasa besar. Oleh karena itu, validasi difokuskan pada daerah kanal terpanas dalam kondisi kehilangan pendingin sampai terjadi sirkulasi alam dan metode CFD menghitung temperatur dengan cukup akurat[5].

Berdasarkan perkembangan terkini tentang aplikasi metode CFD untuk memprediksi distribusi kecepatan kondisi tunak[2] maupun kondisi transien[3,5], maka metode CFD sangat sesuai untuk prediksi distribusi kecepatan dalam subkanal elemen bakar reaktor riset RSG-GAS. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Gambit untuk $\frac{1}{2}$ model dan perhitungan CFD menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3. Tujuan penelitian ini adalah melakukan investigasi distribusi kecepatan pendingin dalam elemen bakar tipe pelat menggunakan metode CFD 3 dimensi untuk reaktor riset RSG-GAS, termasuk investigasi pengaruh interior *handle*. Verifikasi elemen bakar uji reaktor RSG-GAS sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya tanpa interior *handle*[6]. Penelitian ini sangat bermanfaat untuk menunjang pengembangan elemen bakar yang digunakan reaktor riset RSG-GAS untuk desain termohidrolika elemen bakar reaktor riset inovatif dimana elemen bakar reaktor riset inovatif menggunakan elemen bakar yang sama dengan reaktor riset RSG-GAS[7].

ELEMEN BAKAR REAKTOR RISET RSG-GAS

Reaktor RSG-GAS merupakan reaktor riset jenis MTR yang dioperasikan pada daya 30 MWt menggunakan bahan bakar U₃Si₂-Al dengan pengkayaan U²³⁵ sebesar 19,75%[1,8]. Teras reaktor terdiri dari 40 elemen bakar, 8 elemen bakar kendali, 8 posisi iradiasi, dan reflektor *beryllium*. Elemen bakar terdiri dari *end fitting*, *handle* atas, 2 pelat samping, dan 21 pelat bahan bakar dispersi U₃Si₂-Al dengan AlMg₂ sebagai material pembungkus. Gambar 1 memperlihatkan bentuk dan dimensi EB RSG-GAS[1].



Gambar 1. Bentuk dan dimensi elemen bakar RSG-GAS[1] dan material berbeda digunakan untuk RRI [7]

Aliran pendingin air mengalir dari atas elemen bakar menuju bagian bawah dengan laju alir 12,5 kg/s atau dengan kecepatan 3,70 m/s dalam subkanal[1]. Panjang seluruh elemen bakar adalah 868,5 mm. Setiap pelat bahan bakar dalam elemen bakar mempunyai ketebalan 1,30 mm dengan tebal *meat* U_3Si_2-Al sebesar 0,54 mm dan dilapisi pembungkus setebal 0,38 mm. Panjang *meat* adalah 600 mm dan lebar sebesar 62,75 mm. Ujung *end fitting* dirancang berbentuk silinder dengan diameter luar 61 mm, tinggi 171,5 mm, dan tebal dinding 6,6 mm. Bagian atas *end fitting* diperlebar ke bagian transisi yang menahan kedua pelat samping yang memiliki tebal 4,5 mm. Bagian atas pelat samping dilengkapi dengan *handle* dengan diameter 13 mm. *Handle* ini digunakan untuk menerima ujung pemegang *handling tool* pada saat proses pemindahan bahan bakar. Tabel 1 memperlihatkan data desain elemen bakar RSG-GAS.

Tabel 1. Data desain elemen bakar RSG-GAS

Parameter Desain Mekanik Teras Reaktor		
<u>Elemen Bakar</u>		
Jenis	Produksi RI	
Jumlah pelat dalam elemen bakar standar	21	
<u>Pelat Elemen Bakar</u>		
Jumlah pelat bahan bakar di dalam teras	960	
Ketebalan zona <i>meat</i> , mm	0,54	
Lebar zona <i>meat</i> , mm	62,75	
Panjang zona <i>meat</i> , mm	600	
Jenis bahan bakar	U ₃ Si ₂ – Al	
Pengkayaan, %	19,75	
Densitas uranium di dalam <i>meat</i> , g/cm ³	2,96	
Ketebalan kelongsong, mm (rerata)	0,38	
Ketebalan kelongsong, mm (minimum)	0,25	
Desain material kelongsong	AlMg ₂	
Ketebalan pelat bahan bakar, mm	1,3	
Lebar pelat bahan bakar, mm	70,75	
Panjang pelat bahan bakar, mm	625	

METODE CFD

Metode CFD menggunakan pemodelan untuk menentukan ukuran model, diskritisasi, dan kondisi batas. Pemodelan dilakukan berdasarkan $\frac{1}{2}$ model elemen bakar untuk memudahkan pemeriksaan model dari kesalahan pemodelan. Pemodelan 3 dimensi diterapkan supaya interior konstruksi *handle* dan *end fitting* dapat dimodelkan dengan $\frac{1}{2}$ model. Penyelesaian metode CFD menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3 berdasarkan penyelesaian persamaan distribusi aliran, turbulen, dan energi. Model viskositas untuk persamaan turbulen adalah model *k-epsilon*. Model ini dipilih karena memiliki karakteristik yang sesuai dengan kondisi asumsi kecepatan pendingin 3,6 m/s. Alternatif model viskositas dapat menggunakan *k-omega*, *Reynolds Stress*, maupun dengan *Large Eddy Simulation* (LES).

Software FLUENT menerapkan penyelesaian *volume* hingga (*finite volume*) dimana domain dibagi menjadi himpunan *volume* diskritisasi dan persamaan diferensial (1) ini diintegrasikan pada *volume* diskritisasi menjadi persamaan aljabar sebagai persamaan umum konservasi ϕ untuk parameter masa, momentum (u, v, w), dan energi (h). Persamaan konservasi ini sangat tergantung pada densitas fluida ρ [kg/m³], luas aliran pendingin A [m²], *stress tensor* Γ [kg/m.s], dan *volume* V [m³]. Sumber S_ϕ adalah masa yang ditambahkan ke dalam fase kontinuitas. Persamaan konservasi masa diselesaikan dengan persamaan kontinuitas, persamaan momentum mengacu pada persamaan Navier-Stokes, dan persamaan konservasi energi menghitung energi berdasarkan hukum termodinamika.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

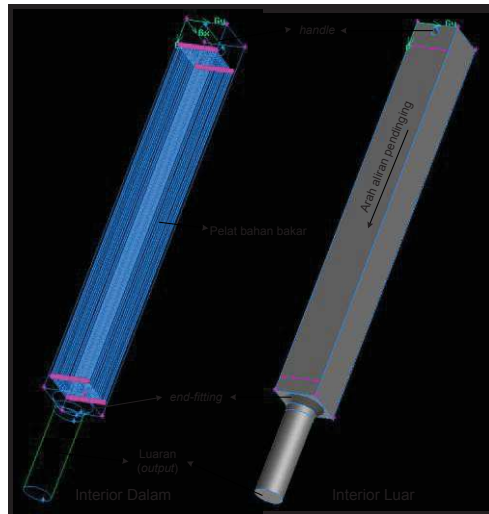
Jumlah persamaan yang diselesaikan dalam metode CFD adalah 3 persamaan konservasi. *K-epsilon* merupakan model dua persamaan tambahan untuk menghitung energi kinetik turbulen, k [J] dan laju disipasi energi kinetik, ε [m²/s³]. Sehingga jumlah persamaan menjadi 5 persamaan. Untuk penyelesaian secara tuntas, masih diperlukan dua persamaan. Persamaan pertama adalah persamaan densitas fluida untuk pendingin air dimana $\rho = \rho_0$. Sedangkan persamaan kedua adalah persamaan yang menghubungkan perubahan entalpi terhadap perubahan temperatur (T) dan tekanan (P). Untuk kondisi densitas yang konstan diperoleh c_p [J/kg.K] yang konstan, sehingga persamaan terakhir untuk energi internal jenis e [J/kg] dapat ditulis sebagai berikut:

$$de = c_p dT \quad (2)$$

Solusi analitik terhadap persamaan Navier-Stoke hanya berlaku untuk aliran yang sederhana seperti kondisi aliran dalam subkanal dimana kondisi ideal berlaku. Metode CFD mengacu persamaan ini dan keseimbangan energi dalam *volume* diskritisasi mengikuti geometri elemen bakar. Ukuran dan jumlah *volume* kontrol ditentukan untuk mempengaruhi akurasi penyelesaian. Penyelesaian keseimbangan energi dan aliran dilakukan secara numerik berdasarkan kondisi batas yang telah ditetapkan. Proses iterasi akan menurunkan residu (*error*) sampai pada jumlah yang dapat diterima. Perhitungan CFD ini akan menghasilkan distribusi kecepatan pendingin secara detail dalam suatu bentuk interior tertentu dimana akurasi sangat ditentukan oleh proses modeling.

TATA KERJA

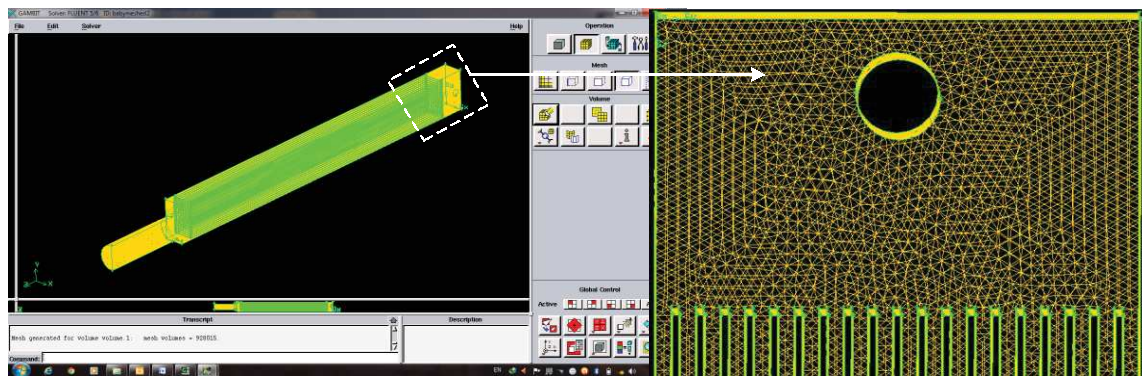
Pemodelan menggunakan $\frac{1}{2}$ model dilakukan dengan skala ukuran penuh. Kemudian model didiskritisasi dan ditentukan area batas berdasarkan jenis masukan (*input*), luaran (*output*), dinding batas (*wall*), dan *mirror*. Pemodelan ini menggunakan perangkat lunak Gambit. Gambar 2 memperlihatkan pemodelan elemen bakar reaktor riset RSG-GAS menggunakan perangkat lunak Gambit.



Gambar 2. Pemodelan elemen bakar reaktor RSG-GAS menggunakan perangkat lunak Gambit.

Model diskritisasi menghasilkan 856.000 diskrit *volume*, cukup teliti untuk dapat dihitung menggunakan komputer pribadi (*personal computer*). Optimasi model dilakukan dengan menggunakan $\frac{1}{2}$ model seperti yang terlihat pada Gambar 3. Gambar 3 juga memperlihatkan hasil diskritisasi *volume*.

Selanjutnya data pemodelan dalam Gambit dikonversi ke data X-Y supaya dapat dibaca oleh perangkat lunak FLUENT. Kondisi batas ditetapkan dalam FLUENT dengan parameter laju alir masukan sebesar 12,5 kg/s dan temperatur 41,5 °C. Pembangkitan panas nominal dalam *meat* dengan dimensi *volume* 0,54x62,75x600 mm sebesar 41 watt/cm²[1]. Iterasi dalam FLUENT ditetapkan konvergen pada kondisi residu mencapai 1.10^{-6} . Sebelum analisis dilakukan, *benchmarking* perhitungan FLUENT, COOLOD, dan CAUDVAP untuk parameter kecepatan pendingin pada posisi tertentu.



Gambar 3. Optimasi $\frac{1}{2}$ model dan diskritisasi EB reaktor riset RSG-GAS

BENCHMARKING

Benchmarking dilakukan dengan menggunakan parameter temperatur luaran (*output*) serta parameter kecepatan pendingin desain. Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan FLUENT dibandingkan dengan data desain untuk parameter temperatur dan Tabel 3 untuk parameter kecepatan pendingin. Hasil ini memperlihatkan bahwa parameter temperatur luaran perlu dihitung ulang menggunakan kode termohidrolika COOLOD karena titik pengukuran temperatur teras berada pada posisi berbeda dengan titik hasil perhitungan FLUENT. Pada titik yang sama, hasil perhitungan temperatur rerata dalam FLUENT sebesar 53,00°C cukup dekat dengan hasil perhitungan COOLOD dan LAK sebesar 52,40°C dengan perbedaan 1,13%. Tabel 3 memperlihatkan perbandingan hasil

perhitungan FLUENT, CAUDVAB, dan data desain untuk parameter kecepatan pendingin dalam subkanal. Perhitungan FLUENT sebesar 3,66 m/s dan data kecepatan pendingin desain sebesar 3,69 m/s tidak memiliki perbedaan yang signifikan, yaitu berbeda sebesar 0,27%.

Tabel 2. Hasil perhitungan FLUENT dibandingkan dengan data desain

Parameter Termohidrolika	FLUENT*	COOLOD	Desain[1]
Batas temperatur masukan	40,50°C	40,50°C	40,50°C
Hasil perhitungan temperatur luaran	53,00°C ^Ψ 53,12°C ^Ω	52,40°C	52,40°C
Temperatur maksimum	54,25°C ^Ω	52,40°C	-

* Nilai rerata, ^Ψ tanpa *handle*[6], ^Ω dengan *handle*

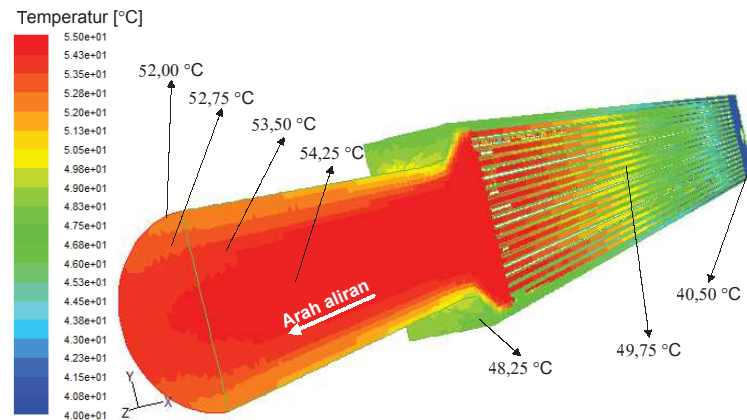
Tabel 3. Perbandingan hasil perhitungan dengan data desain

Posisi Aliran	FLUENT*	CAUDVAB	Desain[1]
Celah bahan bakar	3,66 m/s ^Ψ 3,54 m/s ^Ω	3,69 m/s	3,70 m/s
Bawah celah bahan bakar	2,76 m/s	-	-
<i>End-fitting</i>	5,93 m/s	-	-
Pipa luaran elemen bakar	8,65 m/s	-	-

* Nilai rerata, ^Ψ tanpa *handle*[6], ^Ω dengan *handle*

HASIL DAN PEMBAHASAN

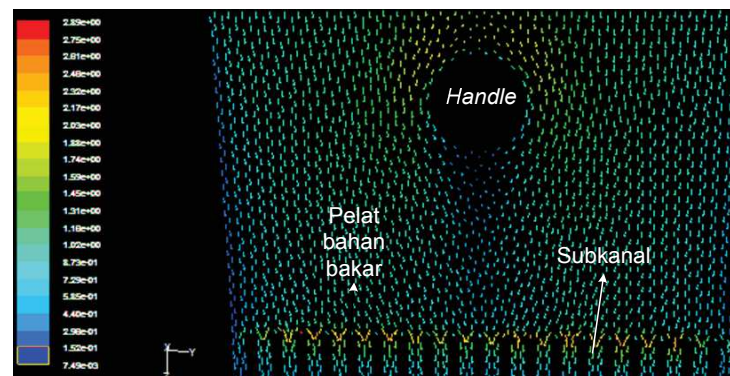
Validasi pemodelan menggunakan Gambit dan perhitungan dengan FLUENT telah memperlihatkan hasil perhitungan dibandingkan dengan data desain dan hasil perhitungan menggunakan kode termohidrolika standar COOLOD dan CAUDVAB. Hasil perhitungan FLUENT diperlihatkan pada Gambar 4 yang menampilkan distribusi temperatur dalam elemen bakar dengan laju aliran pendingin, fluk panas, dan temperatur masukan dengan kondisi laju aliran 12,5 kg/s, fluk panas 41,5 watt/cm², temperatur masukan 40,50 °C. Distribusi panas dalam subkanal terakumulasi pada bagian bawah dan titik posisi bagian bawah subkanal inilah yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan yang sama menggunakan kode termohidrolika COOLOD. Data perbandingan temperatur keluaran sudah ditampilkan pada bagian *benchmarking* Tabel 2. Keberadaan *handle* membuat distribusi kecepatan turun 3,28% yang berdampak pada peningkatan hasil perhitungan temperatur luaran menjadi 53,12°C atau berbeda 0,23% dengan temperatur tanpa *handle*. Hasil ini mengoreksi hasil perhitungan distribusi temperatur dalam elemen bakar RSG-GAS tanpa interior *handle*. Analisis termohidrolika elemen bakar secara lebih detail menggunakan metode CFD ini akan mengkonfirmasi beberapa faktor, yaitu (a) dampak konstruksi *handle* pada bagian masukan elemen bakar (bagian atas) terhadap distribusi kecepatan pendingin ke setiap subkanal, (b) perbedaan distribusi kecepatan pendingin setiap subkanal, dan (c) dampak konstruksi *end fitting* terhadap distribusi kecepatan pendingin.



Gambar 4. Distribusi temperatur dalam elemen bakar

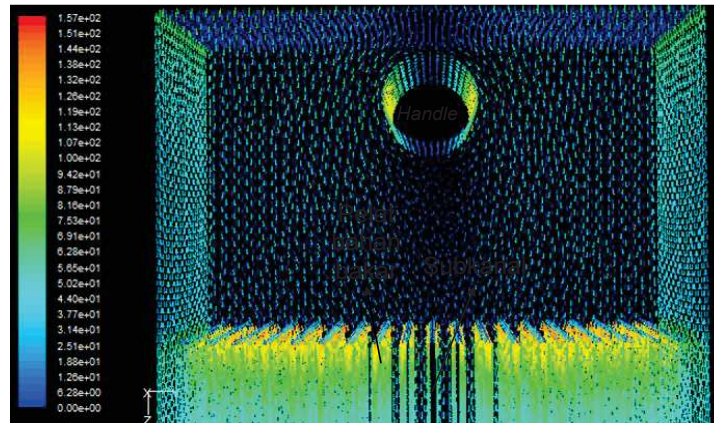
Dampak Konstruksi Handle

Hasil perhitungan CFD memastikan bahwa keberadaan konstruksi *handle* dalam elemen bakar reaktor riset RSG-GAS tidak mempengaruhi distribusi kecepatan pendingin ke setiap celah bahan bakar. Gambar 5 memperlihatkan pengaruh konstruksi *handle* terhadap distribusi energi kinetika aliran turbulen pendingin elemen bakar reaktor riset RSG-GAS. Distribusi kecepatan pendingin pada bagian atas *handle* dan sebagian besar celah bagian atas terlihat lebih cepat secara signifikan. Dampak kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan rerata ini adalah peningkatan tekanan pada material *handle* bagian atas dan pada pelat bahan bakar bagian atas.



Gambar 5. Pengaruh handle terhadap distribusi energi kinetika turbulen aliran pendingin

Gambar 6 memperlihatkan distribusi *shear stress* yang terjadi pada material *handle* bagian atas dan pelat bahan bakar bagian atas. Tekanan rerata fluida masukan adalah 200 kPa (2,00 bar). Berdasarkan hasil perhitungan FLUENT, *handle* bagian atas dan pelat bahan bakar bagian atas menerima tekanan sampai 205 kPa (2,05 bar) atau 2,5% lebih besar dari tekanan rerata. Dampak konstruksi *handle* ini memberikan perbedaan distribusi tekanan pada celah paling luar sebesar 200 kPa (2,00 bar) sedangkan tekanan pada celah lain sebesar 197 kPa (1,97 bar) atau 1,5% lebih rendah dari pada tekanan rerata. Penurunan tekanan lokal ini berbanding lurus dengan penurunan *pressure drop* lokal. Meskipun penurunan *pressure drop* lokal 1,5% ini tidak signifikan, kecepatan aliran pada subkanal dapat terpengaruh menjadi lebih rendah dari nilai desain yang tidak mengasumsikan keberadaan *handle*.

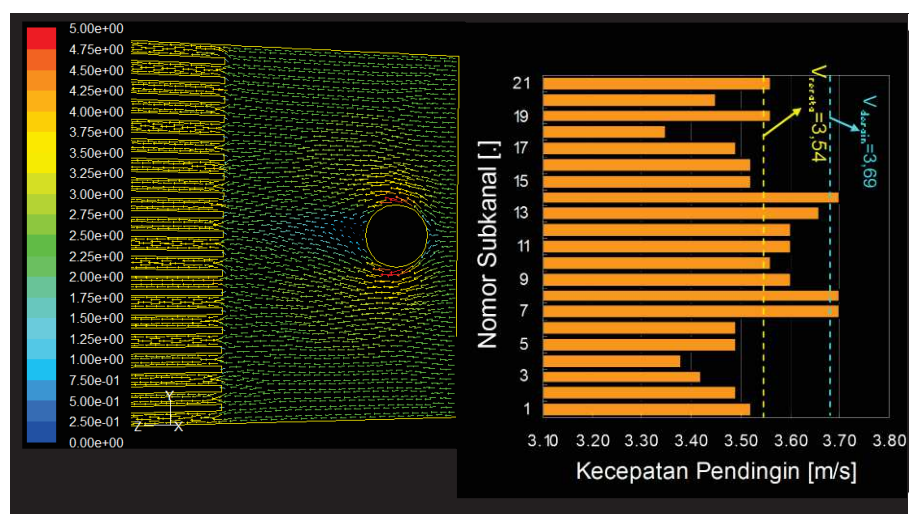


Gambar 6. Pengaruh handle terhadap distribusi shear stress.

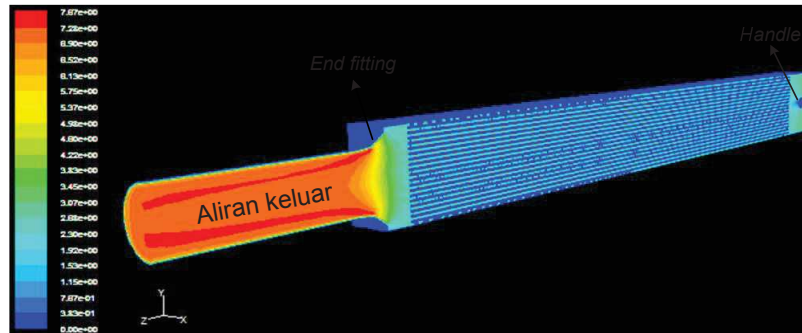
Perbedaan Distribusi Kecepatan Pendingin Setiap Subkanal

Hasil perhitungan FLUENT memastikan bahwa celah bahan bakar memiliki kecepatan pendingin yang seragam. Gambar 7 memperlihatkan bahwa distribusi kecepatan pendingin dalam subkanal elemen bakar reaktor riset RSG-GAS menggunakan FLUENT terlihat seragam dan Gambar 8 memperlihatkan distribusi kecepatan pendingin secara global dalam elemen bakar. Hasil perhitungan FLUENT dalam Gambar 7 memperlihatkan kecepatan rerata 3,54 m/s lebih rendah 4,06% dengan kecepatan desain RSG-GAS seperti yang sudah disampaikan dalam hasil *benchmarking* pada Tabel 3. Gambar 7 juga memperlihatkan grafik pola distribusi kecepatan pendingin antar subkanal. Hasil pola distribusi ini sesuai dengan hasil eksperimen maupun perhitungan CFD 2D terhadap distribusi pendingin pada reaktor riset MNR Kanada[2].

Hasil perhitungan rerata menggunakan FLUENT lebih rendah dari pada hasil perhitungan CAUDVAP yang menjadi acuan kecepatan desain karena perhitungan CAUDVAP bersifat satu dimensi dan tidak memperhitungkan keberadaan *handle*. Sedangkan FLUENT menerapkan perhitungan 3D dan memperhitungkan interior keberadaan *handle*. Keberadaan *handle* memberikan kontribusi penurunan *pressure drop* lokal sebesar 1,5% dibandingkan dengan nilai rerata dalam perhitungan 3D sehingga hasil perhitungan kecepatan aliran lokal dapat menjadi lebih rendah dari perhitungan 1D yang mengabaikan *handle*.



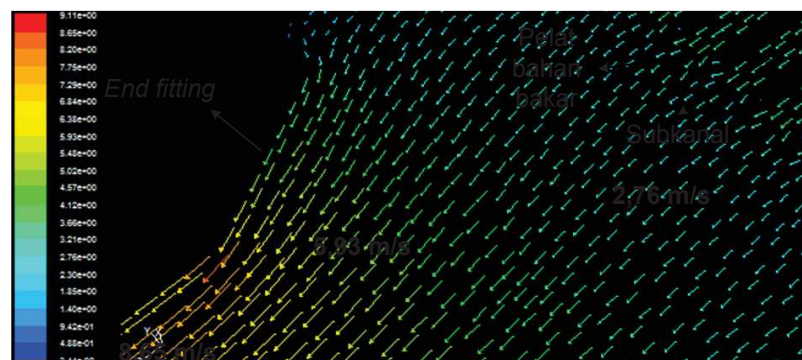
Gambar 7. Distribusi kecepatan pendingin secara detail dalam setiap subkanal.



Gambar 8. Distribusi kecepatan pendingin secara global dalam elemen bakar

Dampak Konstruksi *End Fitting*

Kecepatan pendingin dalam elemen bakar bagian bawah sangat dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk konstruksi *end fitting*. Distribusi kecepatan pendingin pada *end fitting* ini terlihat pada Gambar 9. Kecepatan celah sebesar 3,54 m/s akan menurun setelah luas interior aliran meningkat pada posisi dibawah celah bahan bakar. Pada posisi *end fitting*, luas interior aliran fluida menyempit signifikan sehingga kecepatan pendingin meningkat secara drastis menjadi 5,93 m/s dan terus meningkat menjadi 8,65 m/s pada posisi pipa luaran elemen bakar. Kecepatan aliran fluida dalam elemen bakar bagian bawah ini sudah dijelaskan secara terstruktur dalam Tabel 3 untuk tujuan *benchmarking*.



Gambar 9. Distribusi kecepatan pendingin sebelum memasuki end fitting juga terlihat rata.

Analisis termohidrolika secara detail ini memperlihatkan bahwa hasil perhitungan berdasarkan metode CFD menggunakan FLUENT mendukung hasil perhitungan termohidrolika konvensional 1D menggunakan kode standard COOLOD dan CAUDVAP. Sehingga hasil perhitungan FLUENT dapat digunakan untuk melengkapi analisis keselamatan bersama dengan penggunaan kode perhitungan termohidrolika konvensional dalam desain reaktor riset inovatif. Perhitungan CFD akan diperlukan untuk konfirmasi hasil perhitungan termohidrolik tersebut dengan sudut pandang kondisi interior 3 dimensi yang kompleks seperti desain interior elemen bakar reaktor riset inovatif yang sama dengan elemen bakar RSG-GAS meliputi konstruksi *handle*, subkanal, dan *end fitting*. Analisis distribusi kecepatan pendingin RSG-GAS ini merupakan pola dasar dalam analisis keselamatan distribusi kecepatan pendingin pada elemen bakar reaktor riset inovatif dengan kecepatan pendingin lebih dari 5 m/s untuk 3 kandidat konfigurasi teras[9].

KESIMPULAN

Hasil *benchmarking* memperlihatkan bahwa perhitungan temperatur luaran elemen bakar RSG-GAS menggunakan FLUENT adalah 53,12°C atau lebih tinggi 1,13% dari hasil perhitungan

COOLOD. Hal ini terjadi karena hasil perhitungan FLUENT terhadap kecepatan pendingin dalam subkanal dengan *handle* adalah lebih kecil 4,06% dari nilai desain yang dihitung menggunakan CAUDVAP. Perbedaan ini terjadi karena model FLUENT memperhitungkan keberadaan *handle*, sedangkan kode standar pembanding mengabaikan *handle*. Perbedaan penurunan kecepatan aliran antara tanpa dan dengan *handle* dalam FLUENT adalah 3,28% akibat penurunan pressure drop 1,5% dari nilai rerata dan selanjutnya berdampak pada peningkatan hasil perhitungan temperatur luaran menjadi 53,12°C atau berbeda 0,23% dengan temperatur luaran elemen bakar tanpa *handle*. Hasil perhitungan CFD ini sebanding dengan hasil eksperimen dan perhitungan CFD pada reaktor lain dimana dampak *handle* pada reaktor riset MNR Kanada memberikan penurunan pressure drop $\leq 3\%$ dari nilai rerata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat dilakukan berkat dukungan dana riset Kementrian Riset dan Teknologi dalam bentuk Penelitian Insentif untuk Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa (PI-PKPP) tahun 2012. Oleh karena itu, kami mengucapkan terima kasih atas persetujuan kontrak penelitian dalam rangka mempercepat riset “Desain Reaktor Riset Inovatif” sesuai DIPA PTRKN-BATAN tahun 2010-2014.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG)-BATAN. Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS. Revisi 10. 2008.
2. Ha T., and Garland WJ. Hydraulic study of turbulence flow in MTR-Type nuclear fuel assembly. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. 2006; 236: 975-984.
3. Salam A., and El-Morshedy S. CFD simulation of The IAEA 10 MW Generic MTR reactor under loss of flow transient. *Journal of Annal of Nuclear Engineering*. 2011; 38: 564-577.
4. Hamidouche T., et al. Dynamic calculation of the IAEA safety MTR research reactor benchmark problem using RELAP5/3.2 Code. *Journal of Annal of Nuclear Engineering*. 2004; 31: 1385-1402.
5. Salam A. CFD investigation of flow inversion in typical MTR research reactor undergoing thermal-hydraulic transients. *Journal of Annal of Nuclear Engineering*. 2011; 38: 1578-1592.
6. Endiah PH., dan Subekti M. Analisis termohidrolika elemen bakar uji U-7M0/Al dan U-6Zr/Al di RSG-GAS menggunakan COOLOD-N2, NATCON dan CFD-3D. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. 2013;19-1: 1-14.
7. Endiah PH., dkk. UCD reaktor riset inovatif. Dokumen Teknis Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN; 2010. No.: BATAN-RKN-06-2010.
8. International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE). Advanced fuel cycle and reactor concepts. report of working group 8; 1980. Report No.: INFCE/PC/2/8.
9. Isnaini MD., et al. Analisis distribusi laju alir desain teras reaktor riset inovatif berbahan bakar tingkat muat tinggi. *Prosiding Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir (TKPFN-18)*. Bandung: 2012. hal. 97-108.